

## COMPORTAMENTO DE LAMINADOS MULTI-DIRECCIONAIS DE CFRP PARA A APLICAÇÕES EM ENGENHARIA CIVIL

Sena-Cruz, J.M.<sup>1</sup>; Barros, J.A.O.<sup>2</sup>; Coelho, M.R.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho



### RESUMO

*No âmbito do presente artigo são apresentados os resultados do desenvolvimento de laminados multi-direccionais de polímeros reforçados com fibras de carbono (MDL-CFRP) na reabilitação e reforço de estruturas de betão armado. A utilização de MDL-CFRP tem como objectivo fundamental permitir a introdução de ancoragens, de modo a aumentar a eficiência da ligação entre este material e os elementos a reforçar de acordo com a técnica AEFR (anchored and externally bonded reinforcement). Segundo esta nova técnica, os MDL-CFRP são aplicados nas faces dos elementos a reforçar com recurso à colagem com adesivo e ao uso de ancoragens. Neste trabalho faz-se a descrição do processo de fabrico do MDL-CFRP, e apresentam-se os resultados da caracterização geométrica e mecânica dos mesmos.*

### 1- INTRODUÇÃO

A utilização de polímeros reforçados com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*) na reabilitação e no reforço estrutural tem aumentado de forma sustentada. Para tal contribui o facto de serem materiais leves, com uma elevada relação rigidez/peso, e serem imunes a fenómenos de corrosão. O decréscimo dos custos de fabrico destes compósitos é um factor relevante que tem também potenciado a sua aplicação.

A aplicação de FRP's em elementos estruturais a reforçar está praticamente limitada a FRP's unidireccionais e tem sido efectuada, fundamentalmente, por intermédio das seguintes técnicas: (i) aplicação de mantas (sistemas curados "in situ") ou laminados (sistemas pré-fabricados) colados externamente sobre a superfície do elemento a reforçar (*EBR – Externally Bond Reinforcement*); (ii)

inserção de laminados (ou varões) colados no betão de recobrimento (*NSM – Near-Surface Mounted*). Na aplicação destas duas técnicas a ligação entre elemento de reforço e elemento a ser reforçado é efectuada apenas por colagem e com recurso, habitualmente, a adesivos do tipo epoxy. Para que estas técnicas sejam efectivas é necessário um elevado controlo de qualidade durante todo o processo da aplicação do reforço, nomeadamente na preparação da superfície do elemento a reforçar, do elemento de reforço, na preparação do adesivo e durante a fase de aplicação do reforço e correspondente cura.

Dado que estas técnicas são exclusivamente realizadas através de colagem dos FRP's, a sua eficácia está dependente, em grande medida, das condições de ligação entre elemento de reforço e substrato do elemento a reforçar.

Os modos de rotura dos reforços com FRP's colados podem ser agrupadas nos seguintes tipos (CNR-DT 200/2004; De Lorenzis e Teng 2007): (i) destacamento do material FRP; (ii) destacamento do adesivo; (iii) destacamento na interface adesivo/ betão; e, (iv) desintegração do betão de recobrimento.

Devido ao facto da camada de betão superficial apresentar menores características mecânicas, como consequência, em parte, da sua exposição a agentes de agressividade ambiental, a rotura mais frequente é a desintegração do betão de recobrimento. Assim, o desempenho do reforço está dependente do comportamento do betão superficial, pelo que, de forma geral, nunca se mobiliza a capacidade mecânica total dos FRP's, sendo as roturas do tipo frágil. Por este facto os valores de extensão efectiva recomendados nas formulações de projecto de reforço com estes materiais compósitos são significativamente inferiores à extensão de rotura dos FRP's.

No intuito de evitar a rotura precoce dos reforços em FRP's têm sido aplicados alguns complementos às técnicas anteriormente referidas, como seja a aplicação de sistemas de ancoragem nas extremidades do reforço, constituídos por chapas metálicas aparafusadas, ou pela cintagem com manta de FRP. Esta intervenção localizada exige trabalhos de preparação diferenciados e morosos e conduzem uma concentração de tensões no elemento a ser reforçado.

Mais recentemente têm surgido algumas propostas de reforço alternativas que recorrem a laminados multi-direccionais híbridos com fibras de vidro e de carbono (Bank e Arora 2007; Elsayed et al. 2009). A principal vantagem deste tipo de solução reside no facto do laminado também poder ser ancorado ao longo do seu desenvolvimento. Contudo, nesta técnica têm sido utilizados laminados (SAFSTRIP<sup>®</sup>) com características mecânicas moderadas (resistência à tracção,  $f_{tu}=852$  MPa; módulo de

elasticidade,  $E_f=62$  GPa; resistência ao esmagamento  $\sigma_{br}=214$  MPa e 351 MPa, sem e com pré-esforço).

No âmbito do presente trabalho pretende-se desenvolver um laminado multi-direccional de características mecânicas superiores às dos laminados multi-direccionais existentes no mercado, com custos de produção competitivos.

## 2- PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 - Produção dos laminados

As situações mais frequentes de reforço em estruturas existentes de betão armado são o reforço à flexão. Para tal efeito o laminado unidireccional tem sido o mais usado. Assim, no âmbito do desenvolvimento do laminado optou-se por uma solução que tem em conta o facto do laminado ser, primordialmente, utilizado no reforço à flexão, contudo deverá apresentar características que permitam a sua ancoragem ao elemento a reforçar.

Por outro lado, no âmbito de aplicações em Engenharia Civil, os laminados deverão ser produzidos a custos controlados, sendo a pultrusão um processo frequentemente usado para o efeito. No âmbito do projecto de investigação em curso não foi possível ter acesso a esse tipo de produção de materiais compósitos, tendo por isso, sido adoptado um sistema de produção híbrido. Na Fig. 1 apresenta-se a solução adoptada. O laminado multi-direccional é composto por um laminado pré-fabricado unidireccional carbono/epoxy com a designação comercial CFK<sup>®</sup> 150/2000, produzido pela empresa S&P localizado ao nível do folheto médio e com as fibras a 0°. Em ambas as faces deste laminado são aplicadas duas camadas a  $\pm 45^\circ$  de um pré-impregnado unidireccional de carbono/epoxy com a designação comercial TEXIPREG<sup>®</sup> HS 160 REM, produzido pela empresa SEAL.

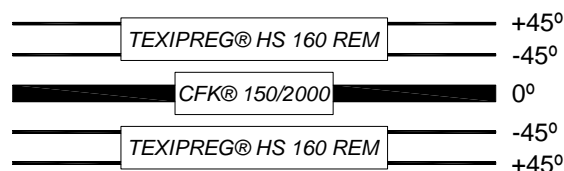


Fig. 1 – Sequência de empilhamento e materiais usados (secção transversal).

Na Tabela 1 apresentam-se as principais características dos materiais que constituem o laminado multi-direccional, de acordo com a informação que consta nas fichas técnicas dos fabricantes.

Tabela 1 – Características dos FRP's usados no fabrico do MDL-CFRP.

Propriedade	CFK® 150/2000	TEXIPREG® HS 160 REM
Espessura [mm]	1.4	0.15
Resistência à tracção [MPa]	2000	1700
Módulo de elasticidade [GPa]	165	150

Os MDL-CFRP (*multi-directional laminates of CFRP*) foram produzidos pelo INEGI - Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, na Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas. O seu processo fabril envolveu as seguintes etapas principais: (i) lixagem das faces das placas de CFK® 150/2000, de modo a melhorar as condições de aderências destas ao pré-impregnado; (ii) empilhamento das camadas de TEXIPREG® HS 160 REM e CFK® 150/2000; (iii) aplicação de um filme desmoldante; (iv) aplicação de um saco de vácuo; (v) processo de cura em autoclave com recurso ao seguinte ciclo de pressão e temperatura: aquecimento à taxa de 3 °C/min até 140 °C; patamar de 1 hora a 140 °C com 2 bar de pressão; arrefecimento à taxa de 3 °C/min até à temperatura ambiente.

Na Fig. 2 apresenta-se o processo de cura adoptado para a produção dos laminados.

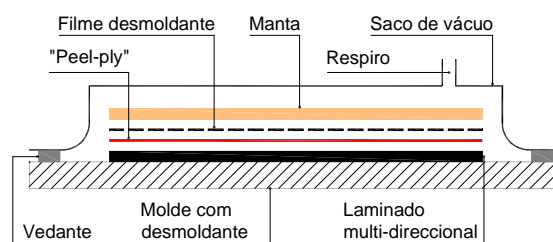


Fig. 2 – Setup usado na produção dos laminados.

Por razões de limitação geométrica dos laminados CFK® 150/2000 e do equipamento de autoclave, produziram-se placas com dimensões de 1400 mm de comprimento por 120 mm de largura.

## 2.2 - Programa de ensaios

O programa experimental teve como objectivo a caracterização geométrica e mecânica do laminado produzido. Adicionalmente, para melhor compreensão dos resultados obtidos foi também caracterizado experimentalmente o CFK® 150/2000 (CFK) e o TEXIPREG® HS 160 REM (HS). Na Tabela 2 apresenta-se o programa de ensaios efectuado com laminado multi-direccional (MDL) e com os laminados unidireccionais CFK e HS (UDL).

Tabela 2 – Programa de ensaios.

Tipo de laminado	Tipo de ensaio/direcção do ensaio	Designação
UDL	Propriedades à tracção a 0°	CFK-TP_d0 HS-TP_d0
	Propriedades à tracção a 45°	CFK-TP_d45
	Propriedades à tracção a 90°	CFK-TP_d90
	Propriedades de flexão a 0°	CFK-FP_d0
	Propriedades de flexão a 0°	MDL-FP_d0
MDL	Propriedades à tracção a 0°	MDL-TP_d0
	Propriedades à tracção a 90°	MDL-TP_d90
	Resistência ao esmagamento	MDL-BS_d0
	Propriedades de flexão a 0°	MDL-FP_d0

Nesta tabela a direcção do ensaio foi definida como sendo a direcção de orientação do ensaio em relação à orientação das fibras do laminado

unidireccional CFK. Para a realização dos ensaios de caracterização das propriedades à tracção, das propriedades à flexão e da resistência ao esmagamento utilizaram-se as recomendações ISO 527-4:1997, ASTM D790-03 e ASTM D 5961/D 5961M-05, respectivamente. Devido a limitações geométricas das placas de MDL produzidas nem sempre foi possível cumprir as imposições geométricas que constam nestas normas. A extracção dos provetes a partir das placas de FRP usadas foi realizada com recurso a corte por jacto de água.

### 2.3 - Ensaios de tracção uniaxial

Os ensaios de tracção uniaxial tiveram como principal objectivo a obtenção das principais propriedades à tracção, nomeadamente resistência à tracção, módulo de elasticidade, extensão na rotura e resposta.

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados obtidos em termos de os valores médios das características geométricas medidas na caracterização geométrica efectuada a todos os provetes ensaiados. Apesar desta informação não ser relevante para a determinação das propriedades à tracção de cada provete ensaiado, permite informar o leitor da ordem de grandeza dos provetes usados, e da variação da propriedades geométricas entre provetes. As grandezas geométricas incluídas na Tabela 3 encontram-se representadas na Fig. 3. Os valores entre parêntesis são os correspondentes coeficientes de variação.

Tabela 3 – Geometria do provete “médio”.

Tipo de provete	$L_2$ [mm]	$L_3$ [mm]	$b_1$ [mm]	$h$ [mm]
CFK-	145.63	245.63	22.52	1.41
TP_d0	(2.6%)	(1.6%)	(0.4%)	(0.5%)
HS-	58.50	118.50	25.42	0.68
TP_d0	(1.2%)	(0.6%)	(3.7%)	(7.2%)
MDL-	149.33	249.33	24.40	2.04
TP_d0	(0.2%)	(0.1%)	(0.5%)	(1.4%)
CFK-	67.00	127.00	22.47	1.40
TP_d45	(0.7%)	(0.4%)	(0.7%)	(0.6%)
CFK-	57.50	117.50	26.85	1.50
TP_d90	(-)	(-)	(0.4%)	(1.0%)
MDL-	58.60	118.83	25.44	2.25
TP_d90	(1.1%)	(0.6%)	(3.0%)	(6.2%)

Da análise de Tabela 3 é possível concluir que, de uma forma geral, a geometria dos provetes apresenta uma variação pouco significativa à excepção dos provetes HS-TP\_d0 e MDL-TP\_d90 cujas espessuras ( $h$ ) tiveram uma variação com algum significado. A principal razão para este facto poderá estar associada ao facto destes provetes terem sido extraídos das zonas de bordo das placas produzidas. A geometria de cada provete poderá ser consultada numa outra publicação (Coelho et al. 2009).

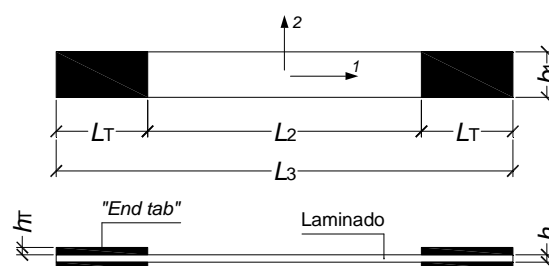


Fig. 3 – Geometria, eixos e dimensões dos provetes para os ensaios de tracção uniaxial.

Os ensaios foram efectuados em prensas servo-controladas distintas, sob controlo de deslocamentos. Para os ensaios dos laminados a 0° foi utilizada uma prensa (Prensa A) com célula de carga com capacidade máxima de  $\pm 200$  kN (com 0.5% de linearidade), tendo os ensaios sido efectuados a uma velocidade de 2 mm/min. Nos ensaios de provetes com fibras a 45° e 90°, bem como para os laminados HS a 0°, utilizou-se outra prensa (Prensa B) com uma célula de carga de 50 kN (com 0.09% de linearidade), tendo sido adoptada uma velocidade de 1 mm/min. Para além do registo das forças e dos deslocamentos ocorridos no provete através de um transdutor interno existente ao nível do actuador, foi também registada a variação de comprimento na zona central do provete através de um “clip gauge” (com 0.2% de linearidade).

Nas Figs. 4 a 8 incluem-se as respostas em termos de tensão versus extensão para os ensaios realizados e considerados como válidos. A tensão é a razão entre a força aplicada e a secção transversal do provete, enquanto a

extensão é o cociente entre variação do comprimento  $L_2$  e o valor inicial  $L_2$  (ver Fig. 3).

Na Tabela 4 apresentam-se os resultados dos principais parâmetros analisados, em termos de valores médios. Nesta tabela  $F_{fmax}$ ,  $f_{fmax}$ ,  $\epsilon_{fmax}$  e  $E_f$  representam a força máxima, a tensão máxima, a extensão para a força máxima e o módulo de elasticidade do laminado, respectivamente. O módulo de elasticidade foi determinado segundo as recomendações da ISO 527-4:1997. Nesta tabela incluem-se também, entre parênteses, os correspondentes coeficientes de variação dos parâmetros analisados.

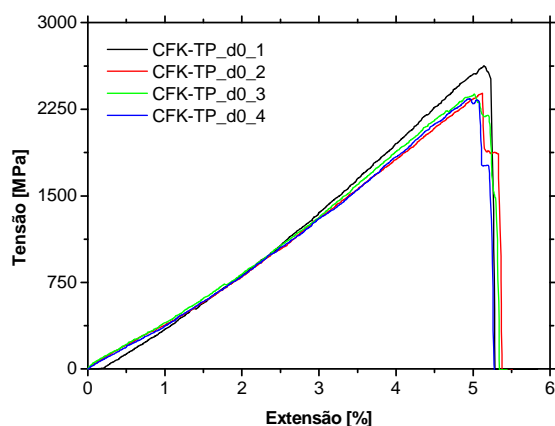


Fig. 4 – Curvas tensão vs. extensão para os laminados CFK ensaiados na direcção 0°.

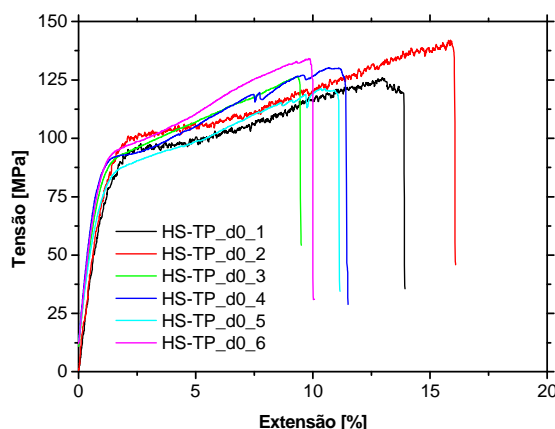


Fig. 5 – Curvas tensão vs. extensão para os laminados HS ensaiados na direcção 0°.

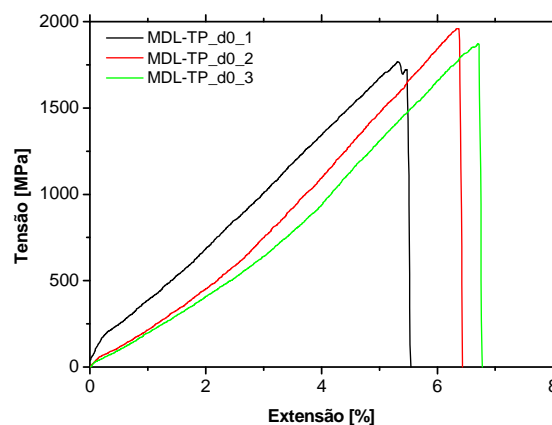


Fig. 6 – Curvas tensão vs. extensão para os laminados MDL ensaiados na direcção 0°.

Para os ensaios efectuados a 0°, verificou-se uma pequena dispersão de resultados, com excepção da  $\epsilon_{fmax}$  e  $E_f$  para os laminados HS. No que respeita ao módulo de elasticidade, tal facto poderá estar associado à dificuldade de medição das deformações através do “clip gauge”, face à geometria do provete. No que se refere a  $\epsilon_{fmax}$  a dispersão poderá estar associada ao sistema de fixação do provete nas amarras. Nos laminados CFK e MDL observa-se um comportamento essencialmente linear até à rotura. Para os laminados HS a resposta tensão versus extensão até à força máxima é composta por dois troços de rigidez significativamente diferente. Este comportamento justifica-se pelo facto de durante o ensaio, numa fase primeira, ter ocorrido a rotura das duas camadas externas e só depois ocorrer a rotura das duas camadas internas.

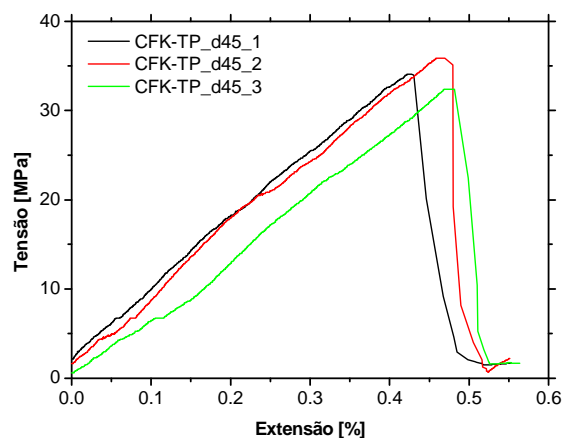


Fig. 7 – Curvas tensão vs. extensão para os laminados CFK ensaiados na direcção 45°.

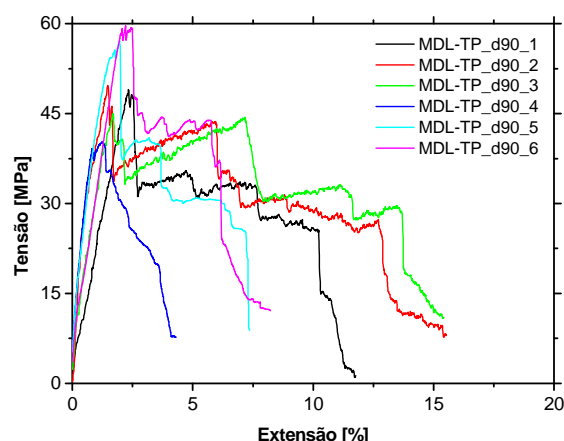


Fig. 8 – Curvas tensão vs. extensão para os laminados MDL ensaiados na direcção 90°.

Ainda relativamente aos ensaios a 0° é possível verificar que o comportamento do MDL é significativamente melhor que a soma dos comportamentos das componentes individuais que o constituem, i.e. CFK e HS. Esta constatação poderá ser verificada através dos resultados incluídos na Tabela 4 em termos de forças. A justificação para este comportamento melhorado está no facto das camadas de HS a  $\pm 45^\circ$  retardarem a rotura do CFK conduzindo a uma maior mobilização da resistência deste.

Tabela 4 – Resultados obtidos nos ensaios de tracção uniaxial (valores médios).

Tipo de provete	$F_{fmax}$ [kN]	$f_{fmax}$ [MPa]	$\epsilon_{fmax}$ [%]	$E_f$ [GPa]
CFK-TP_d0	77.3 (5.1%)	2434.6 (5.3%)	1.50 (4.7%)	157.9 (3.9%)
HS-TP_d0	2.2 (4.9%)	129.1 (6.1%)	1.23 (16%)	10.4 (16%)
MDL-TP_d0	92.7 (3.6%)	1866.2 (5.2%)	1.58 (5.1%)	118.1 (2.8%)
CFK-TP_d45	1.1 (5.3%)	34.1 (5.1%)	0.38 (22%)	9.2 (19%)
CFK-TP_d90	0.14	3.5	0.23	-
MDL-TP_d90	2.9 (17%)	50.1 (15%)	0.64 (12%)	8.2 (15%)

No que respeita aos laminados CFK ensaiados a 45°, observa-se que a resposta é iminentemente linear, contudo os valores de força atingidos são relativamente baixos.

De todos os ensaios realizados com os laminados CFK a 90°, apenas um foi considerado como válido. De facto, os

valores de força atingidos são muito baixos, tendo praticamente impossibilitado a obtenção de resultados. No que diz respeito aos MDL ensaiados a 90° é possível observar uma grande dispersão de resultados. Esta deve-se, fundamentalmente, ao facto do laminado CFK não ter características mecânicas nesta direcção, que constitui o MDL.

## 2.4 - Ensaios de flexão

Tal como referido na secção 2.2, os ensaios de flexão com três pontos de carga foram realizados de acordo com as recomendações da ASTM D790-03. De acordo com a esta norma as dimensões de  $L_T$  e  $L_S$  deverão ser iguais a 60 mm e 40 mm, respectivamente (ver Fig. 9). Relativamente à largura dos provetes,  $b$ , utilizaram-se provetes com 20 mm e 15 mm para o caso do CFK e do MDL, respectivamente. Os ensaios foram realizados na Prensa B com o mesmo tipo de instrumentação (célula de carga e transdutor de deslocamento interno do actuador). Os ensaios dos laminados CFK foram realizados à velocidade de 1.84 mm/min, enquanto os ensaios dos MDL foram efectuados a 1.30 mm/min. A diferença de velocidades deve-se ao facto da norma ASTM D790-03 fazer depender esta da espessura de cada provete. Mais detalhes sobre a configuração destes ensaios poderão ser encontrados numa outra publicação (Coelho et al. 2009).

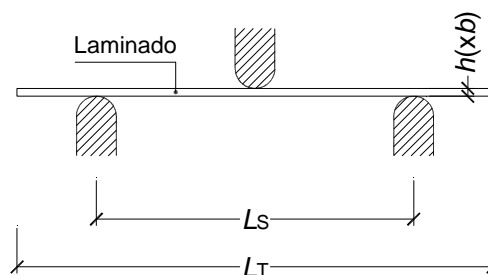


Fig. 9 – Configuração de ensaio à flexão.

Nas Figs. 10 e 11 apresentam-se os resultados obtidos em termos de tensão *versus* extensão para os laminados CFK e MDL, respectivamente. Na Tabela 5 resumem-se os principais resultados obtidos. A tensão,  $f_t$ , a extensão,  $\epsilon_t$ , e o



módulo de elasticidade,  $E_B$ , foram calculados com base nas seguintes equações (ASTM D790-03):

$$f_f = \frac{3 \cdot F \cdot L_s}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot D \cdot h}{L_s^2} \quad (2)$$

$$E_B = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot b \cdot h^3} \quad (3)$$

em que  $F$  é a força medida durante o ensaio,  $D$  é o deslocamento a meio vão e  $m$  é o declive da recta inicial do gráfico força deslocamento.

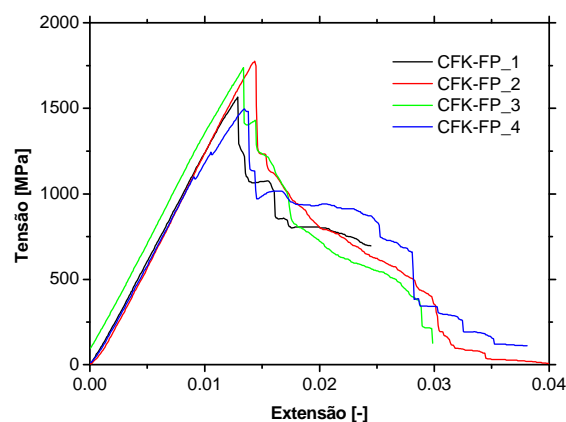


Fig. 10 – Curvas tensão vs. extensão dos ensaios à flexão para os laminados CFK.

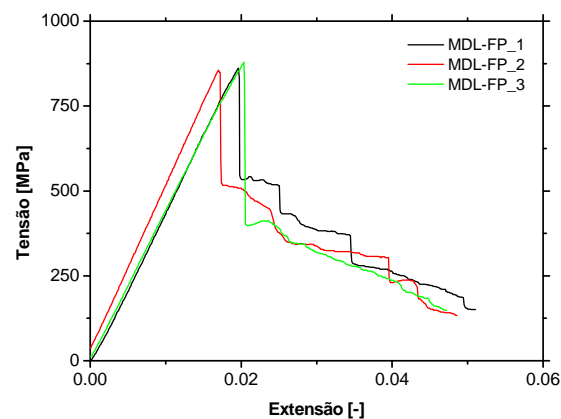


Fig. 11 – Curvas tensão vs. extensão dos ensaios à flexão para os laminados MDL.

Tabela 5 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão com três pontos de carga (valores médios).

Tipo de provete	$F_{fmax}$ [N]	$f_{fmax}$ [MPa]	$\varepsilon_{fmax}$ [%]	$E_B$ [GPa]
CFK	1152.3 (8.1%)	1644.1 (8.1%)	1.35 (4.5%)	124.4 (2.0%)
MDL	910.0 (5.2%)	865.6 (1.4%)	1.90 (9.4%)	46.0 (5.7%)

A partir das curvas apresentadas, observa-se que para ambos os laminados a resposta até à rotura é praticamente linear. No caso dos laminados MDL observou-se que na rotura ocorria delaminação ao nível da interface HS/CFK. Comparando os valores de módulo de elasticidade ( $E_B$ ) obtidos nos ensaios à flexão com os obtidos nos ensaios à tracção, observa-se uma diferença considerável.

## 2.5 - Ensaios de resistência ao esmagamento

A caracterização do MDL ao esmagamento foi realizada através de ensaios de corte duplo com um parafuso, têm por objectivo avaliar a eficiência da ligação aparafusada. No âmbito do presente trabalho utilizaram-se as recomendações existentes na ASTM D 5961/D 5961M-05.

Uma vez que o sistema de reforço a aplicar no betão foi desenhado para a aplicação de ancoragens com M10, optou-se por realizar os ensaios de esmagamento com furos de 10 mm de diâmetro. Para verificar a eficiência do laminado multi-direccional face ao laminado unidireccional, estes ensaios foram realizados com CFK e MDL. Por outro lado, a bibliografia da especialidade revela que a eficiência da ligação com ancoragens melhora com a aplicação de pré-esforço. Assim, foram ensaiados provetes com e sem aplicação de pré-esforço.

Na Fig. 12 apresenta-se a configuração geométrica dos provetes usados. A geometria média dos provetes de CFK é:  $L_2=125$  mm;  $L_3=175$  mm;  $b=59.3$  mm;  $h=1.41$  mm;  $a_1=24.4$  mm;  $a_2=25.0$  mm;  $a_3=27.3$  mm;  $d=9.9$  mm; enquanto que para os provetes de MDL é:  $L_2=125$  mm;  $L_3=175$  mm;  $b=59.3$  mm;  $h=2.08$  mm;  $a_1=24.9$  mm;  $a_2=24.6$  mm;  $a_3=25.3$  mm;  $d=10.0$  mm. A geometria de cada provete poderá ser encontrada noutra publicação (Coelho et al. 2009).

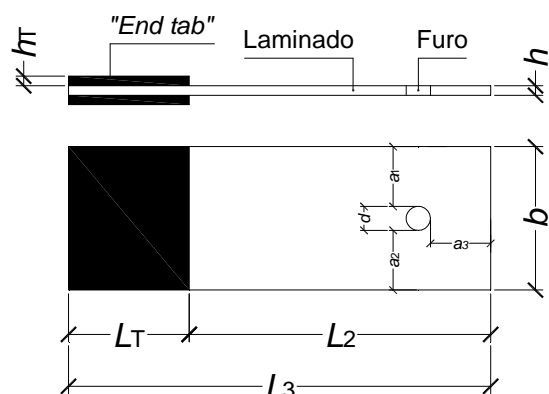


Fig. 12 – Configuração geométrica dos provetes usados.

Os ensaios foram realizados numa prensa servo-controlada, sob controlo de deslocamentos à velocidade de 2 mm/min através do transdutor interno do actuador. A aquisição de dados consistiu, para além dos valores da força e do deslocamento interno do actuador, no registo de deslocamentos em dois transdutores colocados junto à zona do parafuso para medir o deslocamento relativo desta zona em relação à extremidade livre.

Na Fig. 13 apresentam-se fotos ilustrativas do sistema adoptado.



Fig. 13 – Configuração adoptada para os ensaios de resistência ao esmagamento.

Nas Figs. 14 e 15 apresentam-se os resultados obtidos em termos da relação força versus deslocamento de controlo, para os provetes relativos aos laminados CFK e MDL, respectivamente. Os três primeiros resultados relativos aos provetes MDL (1 a 3) correspondem aos provetes nos quais não se aplicou pré-esforço,

enquanto os restantes (4 a 6) são relativos aos provetes em que foi aplicado pré-esforço à ligação com um momento de aperto de 20 N×m. Nestes casos foram usadas anilhas DIN9021.

A partir dos resultados obtidos (ver Tabela 6) é possível concluir que o MDL apresenta uma resistência ao esmagamento cerca de quatro vezes superior àquela que se obtém no CFK. Por outro lado, a aplicação de pré-esforço à ancoragem conduziu a um aumento significativo da resistência ao esmagamento, podendo-se concluir que a aplicação de pré-esforço às ancoragens conduz a benefícios importantes. Nesta tabela  $\sigma_{br,max}$  foi calculada através da razão entre  $F_{fmax}$  e o produto da espessura pelo diâmetro do provete.  $\epsilon_{br,max}$  foi determinado de acordo com a ASTM D 5961/D 5961M-05.

Na Fig. 16 apresentam-se os modos de rotura obtidos. Em todos os ensaios efectuados ocorreu um modo de rotura misto (“shearout” e “bearing”). A componente de “bearing” ocorreu no laminado HS, enquanto que a rotura por “shearout” observou-se no laminado CFK. Também se constatou que com a aplicação de pré-esforço à ancoragem a zona de rotura por “shearout” aumentou (ver Figs. 16(b) e 16(c)), corroborando os resultados numéricos obtidos.

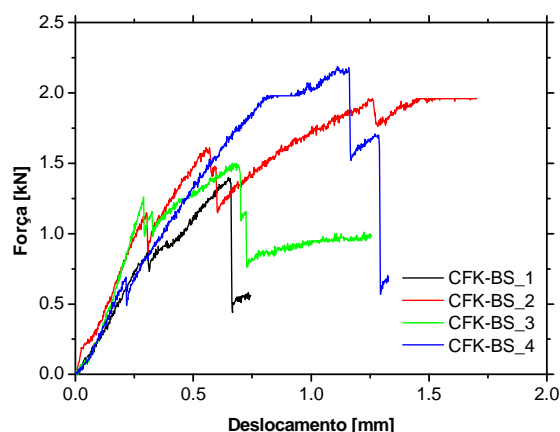


Fig. 14 – Curvas força vs. deslocamento dos ensaios de resistência ao esmagamento para os laminados CFK.



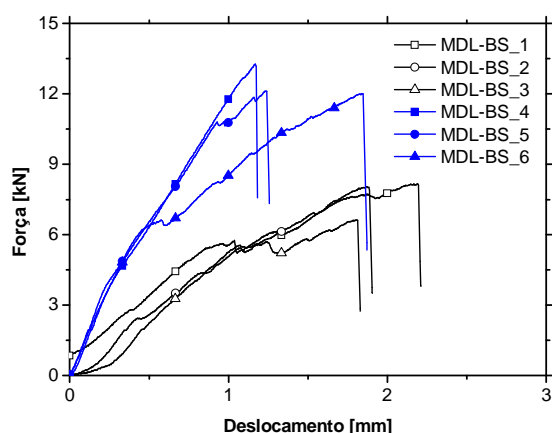


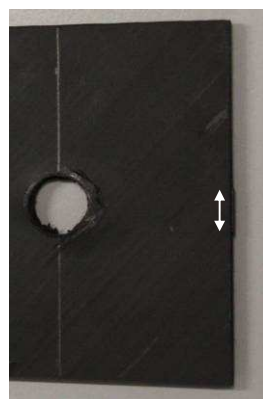
Fig. 15 – Curvas força vs. deslocamento dos ensaios de resistência ao esmagamento para os laminados MDL.

Tabela 6 – Resultados obtidos nos ensaios de resistência ao esmagamento (valores médios).

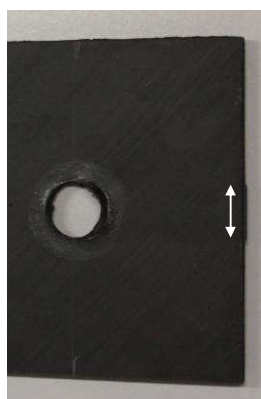
Tipo de provete	$F_{fmax}$ [kN]	$\sigma_{br,max}$ [MPa]	$\varepsilon_{br,max}$ [%]
CFK	1.76 (21.3%)	84.8 (21.4%)	0.08 (36.0%)
MDL-T0	6.63 (11.3%)	316.4 (11.8%)	n.d.
MDL-T20	12.5 (5.6%)	604.4 (5.8%)	n.d.



(a)



(b)



(c)

Fig. 16 – Modos de rotura observados: (a) todos os provetes; (b) provede (MDL\_BS\_1) sem aplicação de pré-esforço; (c) provede (MDL\_BS\_6) com aplicação de pré-esforço.

### 3- CONCLUSÃO

No presente trabalho descreveu-se o desenvolvimento de um laminado multi-direccional de CFRP (MDL-CFRP) com vista à sua aplicação no reforço de estruturas de Engenharia Civil. Por razões de limitações diversas, no âmbito do presente projecto de investigação onde este trabalho se insere, não foi possível realizar a produção com recurso exclusivo à pultrusão. Assim, o MDL-CFRP foi produzido com recurso a um laminado unidireccional de CFRP pré-fabricado, tendo nas suas faces sido adicionais duas camadas de um prepreg unidireccional com fibras orientadas a  $\pm 45^\circ$ . A cura foi efectuada com recurso a autoclave. O MDL-CFRP ortotrópico, foi intencionalmente desenvolvido para ter as propriedades mecânicas máximas na direcção  $0^\circ$ .

Foi efectuada a caracterização mecânica do MDL-CFRP através de ensaios de avaliação das propriedades à tracção, flexão e resistência ao esmagamento. Dos ensaios de tracção uniaxial efectuados foram obtidos os seguintes valores médios de resistência à tracção, módulo de elasticidade e extensão última: 1866 MPa, 118 GPa e 1.58%, respectivamente. Da avaliação das propriedades à flexão foram obtidos os seguintes valores médios de tensão máxima e módulo de elasticidade: 866 MPa e 46 GPa, respectivamente. Dos ensaios de resistência ao esmagamento, efectuados com parafusos com 10 mm de espessura, obteve-se uma tensão de esmagamento média de 316 MPa para os casos de ausência de pré-esforço e 604 MPa, nos casos em se recorreu à aplicação de pré-esforço.

### 4- AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho expressam nesta secção o agradecimento às seguintes pessoas e entidades:

•

- Ao Professor Pedro Camanho, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela contribuição no desenvolvimento dos laminados multi-direccionais;
- À Eng.<sup>a</sup> Célia Novo, responsável de produção da Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas do INEGI a especial colaboração dada na produção dos laminados;
- À Empresa S&P pelo fornecimento dos laminados unidireccionais;
- À TSwaterjet, Lda. pela realização do corte dos provetes a jacto de água.

Por último refere-se que o presente trabalho é financiado pelo programa PIDAC, projecto no. PTDC/ECM/74337/2006 da FCT.

fastened FRP (MF-FRP) strips, *Composite Structures*, 79, p. 180–191.

Elsayed, W., Ebead, U., Neale, K. 2009. Studies on Mechanically Fastened Fiber-Reinforced Polymer Strengthening Systems, *ACI Structural Journal*, 106-206, p. 49-59.

## 5- REFERÊNCIAS

CNR-DT 200/2004: CNR. 2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures: Materials, RC and PC structures, masonry structures.

De Lorenzis, L. e Teng, J.G. 2007. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures, *Journal of Composites: Part B*, 38, p. 119-143.

ISO 527-4: 1997. Plastics - Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites.

ASTM D 790-03. 2003. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.

ASTM D 5961/D 5961M-05. 2005. Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.

Coelho, M., Sena-Cruz, J. e Barros, J. 2009. Caracterização geométrica e mecânica de laminados multidireccionais, Relatório no. 08-DEC/E-33, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 50 pp.

Bank, L. e Arora, D. 2007. Analysis of RC beams strengthened with mechanically